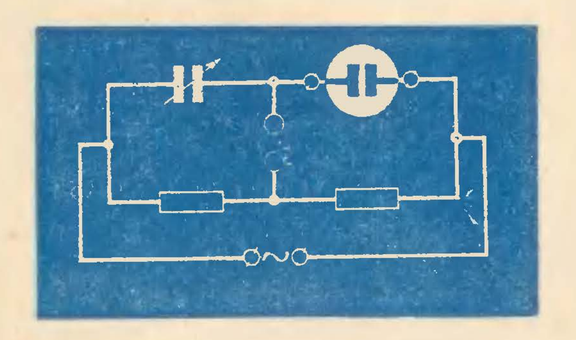


С. Л. МАТЛИН

КАК ИЗМЕРИТЬ ЕМКОСТЬ КОНДЕНСАТОРА





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА
ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

Выпуск 152

С. Л. МАТЛИН

КАК ИЗМЕРИТЬ ЕМКОСТЬ КОНДЕНСАТОРА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1952 ЛЕНИНГРАД

Брошюра знакомит радиолюбителя с простыми методами измерения емкости, которые могут быть использованы в его практической работе. Описания отдельных методов измерений дополнены указаниями по выбору элементов схем измерительных приборов.

Брошюра рассчитана на радиолюбителей, знакомых с основами радиотехники.

СОДЕРЖАНИЕ

Редактор *П. О. Чечик* Техн. редактор *С. Н. Бабочкин*

Сдано в набор 5/VI 1952 г. Подписано к печати 15/X 1952 г.
Бумага $84 \times 108^1/_{32}$=$^3/_8$ бумажного—1,23 п. л. Уч.-изд. л. 1,5
Т-05799 Тираж 35 000 52322 Зак. 3214
Цена 60 к. (номинал по прейскуранту 1952 г.)

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНДЕНСАТОРАХ

Электрической емкостью называется способность проводников удерживать определенное количество зарядов электричества.

Если двум проводникам сообщить разноименный, но равный по величине заряд, то между ними возникнет определенная разность потенциалов. Чем бо́льшую величину заряда сообщить проводам, тем выше будет разность потенциалов. Опыт показывает, что количество электричества, которое способны удержать проводники, т. е. их взаимная емкость, зависит от размеров проводов, расстояния между ними и свойств среды — диэлектрика, находящегося между проводами.

Устройства, состоящие из двух электрически изолированных друг от друга проводников или систем проводников и способные накапливать в себе электрические заряды, называются конденсаторами. В общем случае конденсатор состоит из двух металлических обкладок в форме какой-либо правильной поверхности, например плоской, концентрической или шаровой, разделенных слоем диэлектрика (воздуха, стекла, слюды, бумаги, масла и т. п.).

В зависимости от типа применяемого диэлектрика различают конденсаторы: а) бумажные; б) слюдяные; в) керамические; г) воздушные; д) электролитические и др.

Все конденсаторы делятся на две основные группы: конденсаторы постоянной емкости, у которых величина емкости не может регулироваться, и конденсаторы переменной емкости, у которых емкость можно по желанию регулировать в определенных пределах.

Емкость конденсатора зависит от площади обкладок, числа их, расстояния между ними и типа диэлектрика.

За единицу емкости в практической системе единиц принята фарада (*ф*). Емкостью в 1 *ф* обладает такой конденсатор, которому надо сообщить заряд в 1 *к* (кулон), чтобы напряжение на его обкладках было равно 1 *в* (вольт).

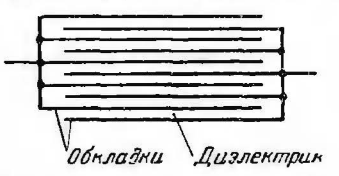
Фарада представляет собой очень большую единицу емкости, и поэтому на практике пользуются более мелкими единицами микрофарадами (*мкф*) и микромикрофарадами (*мкмкф*) или пикофарадами (*пф*).

Электростатической единицей емкости является сантиметр.

Между фарадой и более мелкими единицами емкости существуют следующие соотношения:

$$1\ \text{ф} = 10^6\ \text{мкф} = 10^{12}\ \text{пф} = 9 \cdot 10^{11}\ \text{см}.$$

Большинство конденсаторов постоянной емкости делают плоскими. Диэлектриком в них служат слюда, воздух или бумага. Для получения большой емкости при небольших габаритах конденсатора увеличивают поверхность обкладок, устраивая каждую обкладку из ряда параллельных пластин, соединенных между собой, как это показано на фиг. 1, и уменьшают толщину диэлектрика и расстояние между обкладками.



Фиг. 1. Схематическое устройство конденсатора.

Емкость плоского конденсатора, состоящего из n одинаковых пластин, выражается формулой:

$$C_{\text{пф}} = 0{,}09 \frac{S \cdot \varepsilon}{d} (n - 1), \tag{1}$$

где S — площадь каждой обкладки, $см^2$;
d — расстояние между обкладками, *см*;
n — число пластин;
ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, разделяющего пластины.

Пример. Определить емкость конденсатора, состоящего из 100 пластин размером 5 $см^2$, если в качестве диэлектрика применена слюда ($\varepsilon = 7$) толщиной 1 *мм*.

Решение. $C = 0{,}09 \frac{5 \cdot 7 \cdot 99}{0{,}1} = 3\,118$ *пф*.

Конденсаторы часто соединяются между собой последовательно либо параллельно. Реже прибегают к смешанному соединению конденсаторов.

При последовательном соединении двух конденсаторов C_1 и C_2 общая емкость такой группы

$$C_{\text{посл}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}. \tag{2}$$

Общая емкость группы последовательно соединенных конденсаторов всегда меньше наименьшей емкости конденсатора, входящего в группу. Как мы увидим ниже,

этим обстоятельством часто пользуются для расширения пределов измерения емкости конденсаторов.

При параллельном соединении двух конденсаторов C_1 и C_2 общая емкость их.

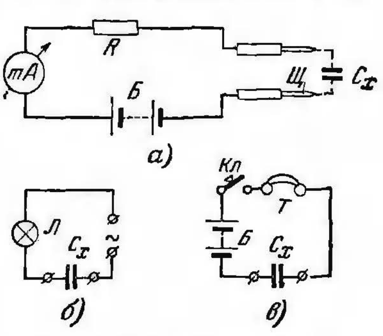
$$C_{пар} = C_1 + C_2 \qquad (3)$$

увеличивается по сравнению с емкостью каждого отдельного конденсатора.

Каждый конденсатор характеризуется рабочим напряжением, т. е. напряжением, при котором он может длительно работать без опасности пробоя. Это напряжение обычно для каждого типа конденсатора указывается на этикетке конденсатора либо приводится в справочных таблицах. При измерении емкости необходимо следить, чтобы максимальное напряжение на конденсаторе не превышало рабочее, так как иначе может наступить пробой конденсатора и выход его из строя.

ПРОВЕРКА ИСПРАВНОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ

Перед измерением емкости необходимо проверить конденсатор на отсутствие пробоя, обрыва и на величину утечки, так как правильные результаты измерений можно получить только для исправного конденсатора.



Фиг. 2. Схемы для проверки конденсаторов.

Проверку постоянных и переменных конденсаторов любой емкости на отсутствие короткого замыкания можно произвести с помощью пробника. Пробник (фиг. 2,*а*) состоит из какого-либо источника тока *Б* с напряжением от 5 до 80 *в*, измерительного прибора *mA* и сопротивления *R*. Величина сопротивления *R* выбирается таким образом, чтобы при замыкании щупов *Щ* стрелка прибора отклонялась на всю шкалу.

Для проверки конденсатора C_x его следует присоединить к щупам. При исправном конденсаторе стрелка прибора в момент включения даст небольшое отклонение (при больших значениях емкости) за счет тока заряда, после

чего она возвратится на нулевое деление шкалы. При неисправном конденсаторе, т. е. при наличии пробоя или короткого замыкания, стрелка прибора отклонится на всю шкалу.

Проверку на отсутствие пробоя можно также произвести включением конденсатора в осветительную сеть последовательно с лампой накаливания мощностью порядка 16—25 *вт* (фиг. 2,*б*).

Проверку конденсаторов постоянной емкости на утечку удобно производить, пользуясь схемой, показанной на фиг. 2,*в*. На этой схеме *Б* — источник постоянного напряжения от 3 до 20 *в*, *Т* — телефонные трубки, *Кл* — ключ и C_x—испытуемый конденсатор. С помощью этой схемы можно испытывать конденсаторы от нескольких десятков микрофарад до 100 *пф*.

Если ключ *Кл* периодически кратковременно замыкать и размыкать один раз в 2—3 сек., то при первом же замыкании конденсатор C_x зарядится, и в телефоне будет слышен щелчок. При повторных замыканиях ключа *Кл*, если конденсатор C_x исправен, щелчков уже не будет слышно, так как конденсатор за это время не успеет разрядиться. Если же конденсатор неисправен и имеет большую утечку, то при каждом новом замыкании будет слышен щелчок, так как за время размыкания цепи конденсатор будет успевать разряжаться.

Конденсаторы емкостью более 0,08 *мкф* можно также проверить «на искру». Для этого конденсатор сначала заряжают от сети постоянного либо переменного тока напряжением 120 *в*, а затем выводы его замыкают между собой. Если конденсатор исправен, то в момент замыкания выводов проскочит искра. При заряде конденсатора от сети переменного тока испытание нужно повторить несколько раз, поскольку возможно, что в момент отключения конденсатора от сети мгновенное значение напряжения переменного тока окажется равным или близким к нулю, и конденсатор не зарядится. Включение конденсатора в сеть нужно производить последовательно с предохранителем на 100—200 *ма*.

Электролитические конденсаторы надо проверять только на постоянном токе при помощи омметра, соблюдая полярность подключения его к измерительной схеме. Исправный электролитический конденсатор должен иметь сопротивление утечки не менее 0,1 *мгом*.

МЕТОД ВОЛЬТМЕТРА-АМПЕРМЕТРА

Методы измерения емкости многочисленны и разнообразны. В радиоизмерительной технике применяются баллистический метод, метод вольтметра-амперметра, резонансный, мостовые схемы и др.

Рассмотрим те из них, которые, не претендуя на большую точность, сравнительно просты и поэтому могут найти широкое применение в практике радиолюбителя.

Известно, что конденсатор C, включенный в цепь переменного тока, оказывает прохождению тока некоторое сопротивление X_c, величина которого зависит от частоты и емкости конденсатора C. Это сопротивление X_c, называемое емкостным сопротивлением, математически выражается следующей зависимостью:

$$X_c = \frac{1}{6{,}28 f C}, \qquad (4)$$

где X_c — сопротивление, *ом*;

f — частота питающего тока, *гц*;

C — емкость, *ф*.

Пример. Определить емкостное сопротивление конденсатора при частотах $f = 50$ *гц* и $f = 5\,000$ *гц*, если емкость конденсатора равна 1 *мкф*.

Решение. 1. $X_c = \frac{10^6}{6{,}28 \cdot 50 \cdot 1} = 3\,180$ *ом*.

2. $X_c = \frac{10^6}{6{,}28 \cdot 5\,000 \cdot 1} = 31{,}8$ *ом*.

Из выражения (4) следует, что чем выше частота питающего тока и чем больше емкость, тем меньше будет сопротивление, которое оказывает конденсатор прохождению переменного тока.

Метод вольтметра-амперметра основан на использовании закона Ома для цепи с емкостью, согласно которому между емкостным сопротивлением X_c конденсатора, силой тока I, протекающего через него, и падением напряжения U на нем имеется определенное соотношение:

$$X_c = \frac{U}{I} = \frac{1}{6{,}28 f C}. \qquad (5)$$

Из этого выражения следует, что для определения емкости C нужно знать напряжение U на конденсаторе, ток I через конденсатор и частоту f источника тока.

Если в качестве источника тока используется обычная осветительная сеть переменного тока с частотою 50 *гц*, то емкость можно вычислить по формуле

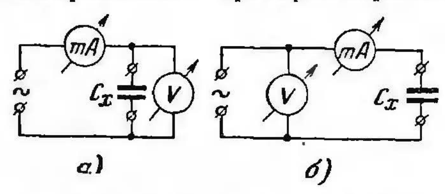
$$C = \frac{3{,}2I}{U}, \qquad (6)$$

где C в микрофарадах, если I в миллиамперах и U в вольтах.

Пример. Определить емкость конденсатора C, если в результате измерения оказалось, что ток в цепи конденсатора равен 35 *ма*, а напряжение на конденсаторе равно 110 *в*.

Решение. $C = \frac{3{,}2 \cdot 35}{110} \approx 1$ *мкф*

Для измерения емкости по описываемому методу можно применить одну из двух схем, приведенных на фиг. 3. Измерительные приборы переменного тока — вольтметр V и милиамперметр mA — для заданного предела измерения емкости выбирают, исходя из величин напряжения и частоты, на которых производятся измерения. Лучшие результаты в отношении точности измерения получаются при использовании термогальванометра и лампового вольтметра.



Фиг. 3. Схемы для измерения емкости методом вольтметра-амперметра.
а — для больших емкостей; *б* — для малых емкостей.

При измерении емкости по схеме фиг. 3,*а* миллиамперметр mA измеряет ток, протекающий через емкость C_x и через вольтметр V, поэтому определение емкости по вышеприведенной формуле без заметной погрешности возможно в том случае, когда ток, проходящий через конденсатор, намного больше тока, протекающего через вольтметр. Это будет иметь место при малой величине емкостного сопротивления X_c, т. е. при измерении больших емкостей.

При измерении малых емкостей более точные результаты дает схема, приведенная на фиг. 3,*б*. Измерение малых емкостей методом вольтметра-амперметра требует применения достаточно чувствительных измерительных приборов. Поскольку радиолюбители не всегда могут иметь такие приборы, этот метод можно рекомендовать только для измерения сравнительно больших емкостей (примерно от 0,2 *мкф*

и больше), позволяющих использовать сравнительно грубые приборы (например, миллиамперметры до 100—200 *ма*).

Метод вольтметра-амперметра прост, зато ему свойственны большие погрешности. Основные погрешности при измерении емкости вызваны малой точностью измерительных приборов, а также шунтирующим действием вольтметра *V* (в схеме фиг. 3,*а*).

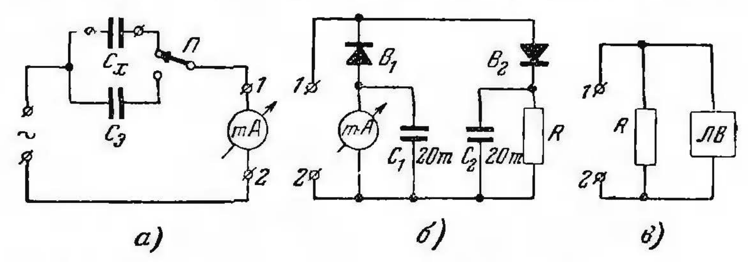
Напряжение переменного тока, подаваемое на зажимы, берется от 10 до 120 *в* в зависимости от величины измеряемой емкости, чувствительности применяемых приборов и рабочего напряжения конденсатора.

Следует отметить, что для обеих схем фиг. 3 характерно отсутствие образцовых (эталонных) емкостей, так как определение величины емкости производится непосредственно из показаний измерительных приборов.

Измерения нужно производить осторожно, так как в случае замыкания проводов, подключаемых к конденсатору *С*, через миллиамперметр *mA* резко возрастет ток, и прибор выйдет из строя.

МЕТОД СРАВНЕНИЯ

При этом методе измерения сравнивают между собой сопротивление измеряемой (неизвестной) емкости с сопротивлением известной образцовой емкости. Один из возмож-



Фиг. 4. Схема для измерения емкостей методом сравнения.

ных вариантов схемы приведен на фиг. 4,*а*. Напряжение источника переменного тока следует по возможности поддерживать постоянным. Если в качестве образцовой емкости $C_э$ используется магазин емкостей, то, изменяя величину $C_э$, добиваются одинаковых показаний прибора *mA* при двух положениях переключателя *П*. При равенстве

показаний прибора $C_x = C_э$. Так как при этом методе знать абсолютное значение силы тока несущественно, то вместо термогальванометра *mA* можно воспользоваться детекторным индикатором (фиг. 4,*б*) или ламповым вольтметром (фиг. 4,*в*). Сопротивление *R* в схеме фиг. 4,*б* выбирается равным сопротивлению измерительного прибора *mA* (миллиамперметра или микроамперметра), а в схеме фиг. 4,*в* оно должно быть примерно в 20 раз меньше сопротивления измеряемой емкости C_x. Индикаторы (фиг. 4,*б* или 4,*в*) подключаются между зажимами *1—2* схемы, приведенной на фиг. 4,*а*, вместо прибора *mA*.

Если магазина емкостей нет, то можно воспользоваться постоянным образцовым конденсатором. В этом случае показания прибора *mA* или другого индикатора при двух положениях переключателя *П* будут различны, и величина измеряемой емкости определится из уравнения

$$C_x = \frac{I_x}{I_э} \cdot C_э, \qquad (7)$$

где C_x — величина емкости измеряемого конденсатора;

$C_э$ — величина емкости известного образцового конденсатора;

I_x — показания индикатора в произвольных единицах при включении неизвестного конденсатора;

$I_э$ — показания индикатора в тех же единицах при включении образцового конденсатора.

Пример. $C_э = 0{,}1$ *мкф*; $I_э = 3{,}7$ *ма*; $I_x = 37$ *ма*. Требуется определить C_x.

Решение. $C_x = \frac{37}{3{,}7} \cdot 0{,}1 = 1$ *мкф*.

При применении в качестве индикатора лампового вольтметра вместо $I_э$ и I_x берутся соответствующие значения напряжения $U_э$ и U_x. Чем ближе величина образцовой емкости $C_э$ к величине измеряемой, тем меньше погрешность измерений. Во избежание ошибок надо предварительно тщательно проверить сопротивление изоляции конденсатора C_x. Оно должно быть больше значения $\frac{1}{6{,}28 f C_x}$ не менее чем в 100 раз. Максимальное и мини-

мальное значения емкости, которые могут быть измерены методом сравнения, зависят от чувствительности прибора, напряжения и частоты, при которой производятся измерения.

Пример. Имеется термогальванометр на 100 *ма*, с первой отсчетной точкой на шкале 5 *ма*. В качестве источника для питания схемы фиг. 4,*а* используется электросеть с напряжением $U=127$ *в* и частотой $f=50$ *гц*. Определить крайние значения емкостей, которые могут быть измерены при этих условиях.

Решение. Для того чтобы обеспечить в цепи минимальный ток 5 *ма* при напряжении 127 *в*, необходимо в цепь включить емкостное сопротивление

$$X_c=\frac{U}{I}=\frac{127\cdot 10^3}{5}=25\,400\ ом.$$

При частоте сети f, равной 50 *гц*, такое сопротивление обеспечит емкость

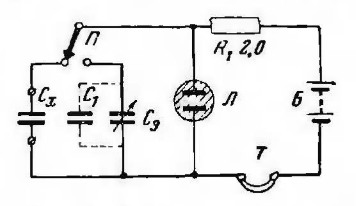
$$C_1=\frac{1}{X_c\cdot 6{,}28f}=\frac{1}{25\,400\cdot 6{,}28\cdot 50}=0{,}12\cdot 10^{-6}\ ф=0{,}12\ мкф.$$

Аналогично можно подсчитать, что при напряжении сети $U=127$ *в* ток в цепи, равный 100 *ма*, получится при емкости

$$C_2=\frac{10^6\cdot I}{6{,}28\cdot f\cdot U}=\frac{10^6\cdot 100\cdot 10^{-3}}{6{,}28\cdot 50\cdot 127}=2{,}5\ мкф.$$

Таким образом, при данных условиях могут быть измерены емкости, лежащие в пределах от 0,12 до 2,5 *мкф*.

На фиг. 5 дан другой вариант измерения емкостей методом сравнения, с помощью которого можно измерять емкости конденсаторов примерно от 20 до 1 000 *пф*, а также собственную емкость антенны, монтажа и пр. Схема предложена радиолюбителем Ю. Кравченко и опубликована в «Радио» № 6, 1949 г. Большим достоинством этой схемы является отсутствие в ней измерительных приборов.



Фиг. 5. Схема для измерения емкости по методу сравнения без применения измерительных приборов.

Основной частью схемы является генератор релаксационных колебаний на неоновой лампе *Л*. При включении схемы начинается заряд конденсатора C_x через сопротивление R_1. Заряд этот продолжается до тех пор, пока напряжение на конденсаторе C_x не достигнет величины, равной напряжению

зажигания неоновой лампы. До этого момента неоновая лампа подобна конденсатору весьма небольшой емкости, присоединенного параллельно емкости C_x. После того как напряжение на неоновой лампе достигло величины напряжения зажигания, лампа вспыхивает, ее сопротивление резко падает, и конденсатор C_x начинает быстро разряжаться через неоновую лампу, пока напряжение на конденсаторе C_x не упадет до величины, равной напряжению, при котором лампа погаснет. Такой процесс будет повторяться периодически с частотой, которая в первом приближении обратно пропорциональна постоянной времени цепи, т. е. $\frac{1}{R_1 C_x}$. Переменная составляющая тока, протекающая в цепи, является источником звуковых колебаний, прослушиваемых в телефоне T.

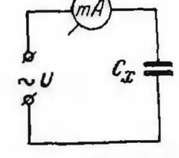
При постоянных параметрах цепи (напряжения питания U и зарядного сопротивления R_1) частота звуковых колебаний, слышимых в телефоне, определяется величиной емкости конденсатора, включенного параллельно неоновой лампе *Л*. Это обстоятельство и позволяет использовать схему для измерения емкостей.

Для определения величины емкости C_x надо подогнать емкость конденсатора $C_э$ так, чтобы при переключении переключателя *П* частота колебаний, слышимых в телефоне, осталась одной и той же. Очевидно, что при этих условиях емкость C_x будет равна емкости образцового конденсатора $C_э$. Шкала конденсатора $C_э$ градуируется в единицах емкости. Этот образцовый конденсатор переменной емкости желательно выбрать прямоемкостного типа с максимальной емкостью 500—700 *пф*. Для расширения предела измерений в сторону больших емкостей параллельно образцовому конденсатору можно подключить дополнительный конденсатор постоянной емкости C_1 порядка 300—500 *пф*. В этом случае величина измеряемой емкости C_x определится суммой емкостей конденсаторов $C_э$ и C_1.

Напряжение источника питания должно быть на 30—50% выше напряжения зажигания неоновой лампы. При использовании малогабаритной неоновой лампочки уверенная работа схемы обеспечивается при напряжении батареи, равном 100 *в*. Данная схема позволяет измерять емкости с точностью $\pm 10\%$.

МИКРОФАРАДОМЕТР

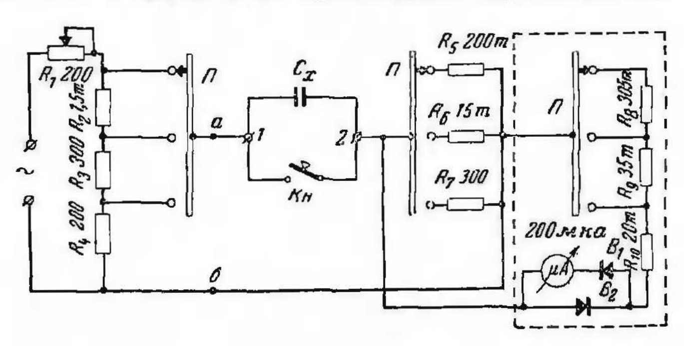
Микрофарадометрами называются приборы, предназначенные для измерения емкости конденсаторов с непосредственным отсчетом измеряемой величины. Простейшие типы подобных приборов представляют собой миллиамперметры для измерения переменного тока со шкалой, проградуированной в единицах емкости. Одна из простейших схем микрофарадометра приведена на фиг. 6.



Фиг. 6. Простейшая схема микрофарадометра.

При неизменном значении напряжения U и частоте f источника тока, ток I в цепи определяется величиной емкости конденсатора C_x, и поэтому миллиамперметр mA может быть отградуирован непосредственно в единицах емкости.

На фиг. 7 приведена практическая схема любительского микрофарадометра, который позволяет измерять величины емкостей, лежащих в пределах 600 *пф*—10 *мкф*. Указанный диапазон измерения разбит на 3 поддиапазона: 600—50 000 *пф*, 0,01 — 0,5 *мкф* и 0,5—10 *мкф*. Переключение прибора на один из указанных поддиапазонов производится переключателем *П*.



Фиг. 7. Практическая схема микрофарадометра.

Основной частью прибора является вольтметр переменного тока на три предела измерений 0—10, 0—50 и 0—200 *в*, который должен обладать возможно большей величиной входного сопротивления. Вольтметр собран по однополупериодной схеме из микроамперметра μA, двух выпрямительных элементов B_1 и B_2 (купроксных) типа ВК-707-14 и добавочных сопротивлений R_8, R_9 и R_{10}. На фиг. 7 схема вольтметра обведена пунктиром.

Прибор работает следующим образом. Сеть переменного тока с напряжением 220 *в* присоединяется через делитель, состоящий из сопротивлений R_1, R_2, R_3 и R_4 ко входу (точки *а—б*) микрофарадометра. Если зажимы *1—2* с помощью кнопки *Кн* разомкнуть и присоединить к ним конденсатор C_x, то в зависимости от положения переключателя *П* через конденсатор C_x и одно из сопротивлений R_5—R_7 потечет ток, величина которого может быть определена по закону Ома.

Напряжение между точками *а* и *б* схемы распределится между одним из сопротивлений R_5—R_7 и емкостным сопротивлением конденсатора C_x. Если к зажимам *1—2* подключать конденсаторы C_x различной емкости, то величина напряжения, измеряемого вольтметром на сопротивлении R_5—R_7, будет изменяться, так как конденсаторы различной емкости имеют различное емкостное сопротивление, и поэтому падения напряжения на конденсаторе и одном из сопротивлений R_5—R_7 будут перераспределяться.

При постоянных параметрах цепи, а именно: питающего напряжения, частоты и сопротивления, показания вольтметра будут определяться только величиной емкости конденсатора C_x, поэтому вольтметр можно отградуировать непосредственно в единицах емкости.

Перед каждым измерением надо зажимы *1—2* замкнуть накоротко, переключатель *П* установить на соответствующий поддиапазон и вращением ручки потенциометра R_1 добиться того, чтобы стрелка вольтметра отклонилась на всю шкалу. Величина переменного сопротивления R_1 зависит от того, в каких пределах колеблется напряжение сети. Деление шкалы вольтметра, соответствующее отклонению стрелки на всю шкалу, помечается индексом $C=\infty$.

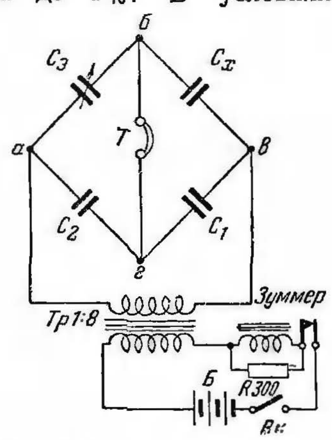
Градуировку микрофарадометра производят измерением различных известных емкостей, подключаемых к зажимам *1—2*. На шкале прибора у места остановки стрелки делают пометку величины измеренной емкости. Точность градуировки микрофарадометра зависит от точности образцовых емкостей и количества отсчетов. Прибором удобнее пользоваться, если каждому поддиапазону дана отдельная шкала. Четвертая шкала градуируется в вольтах; тогда прибором в случае нужды можно пользоваться и как вольтметром. При тщательной градуировке прибора средняя погрешность измерения на всех шкалах не превышает $\pm 10\%$.

Для увеличения точности измерения следует купроксный вольтметр заменить ламповым.

МЕТОД МОСТА

Метод измерения емкостей конденсаторов при помощи мостовых схем, питаемых напряжением звуковой частоты, является одним из наиболее распространенных.

Достоинствами приборов, работающих по мостовым схемам, являются простота их конструкции, портативность, широкий диапазон измеряемых емкостей и, главное, удобство и быстрота производства измерений. В зависимости от схемы моста и его конструктивного выполнения точность измерения может быть доведена до 1%. В условиях радиолюбительской практики мостовые схемы надо признать наиболее целесообразными.



Фиг. 8. Простейшая схема моста для измерения емкости.

Простейшая схема моста для измерения емкости приведена на фиг. 8. В этой схеме четыре емкости $C_э$, C_x, C_1 и C_2 включены замкнутым четырехугольником. В одну из диагоналей четырехугольника включается чувствительный индикатор — телефон T, а в другую — источник напряжения звуковой частоты. Четыре емкости, составляющие четырехугольник, называются плечами моста. В общем случае, при включенном источнике тока, ток в цепи телефона не равен нулю. Отсутствия тока в телефоне можно добиться, изменяя величины емкостных сопротивлений (емкостей) отдельных плеч.

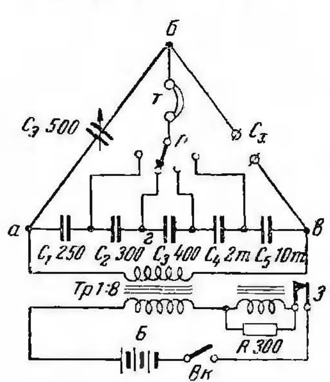
Если падение напряжения на конденсаторе $C_э$ равно падению напряжения на конденсаторе C_2, а падение напряжения на конденсаторе C_x равно падению напряжения на конденсаторе C_1, то в точках *б* и *г* потенциалы будут одинаковы, и следовательно, ток в телефонной трубке будет отсутствовать. Такое положение называется равновесием (балансом) моста. В момент равновесия моста между емкостями, входящими в отдельные плечи, существует определенное соотношение $C_э \cdot C_1 = C_2 \cdot C_x$, из которого следует, что, зная три емкости, можно определить емкость четвертого конденсатора, например C_x:

$$C_x = \frac{C_1}{C_2} \cdot C_э . \qquad (8)$$

При измерении емкости конденсаторов методом моста в одно плечо включают конденсатор C_x неизвестной емкости, а три другие плеча должны содержать конденсаторы известной емкости, величины которых можно изменять для получения равновесия моста.

Из выражения (8) легко заметить, что равновесие моста может быть получено изменением емкости конденсатора $C_э$ и подбором нужного отношения $\frac{C_1}{C_3}$, которое обычно выбирается кратным десяти.

Получить полное равновесие моста при указанной схеме моста можно только в том случае, если все конденсаторы, входящие в плечи моста, не имеют потерь. Наличие потерь у отдельных конденсаторов приводит к тому, что такой мост полностью сбалансировать не удается, и поэтому равновесие моста определяется по минимуму слышимости в телефоне. Некоторое понижение точности измерения из-за отсутствия полного баланса моста не играет существенного значения в практике радиолюбителя. Вместе с тем мост с емкостными плечами очень прост в обращении и безотказен в работе.



Фиг. 9. Практическая схема моста для измерения емкости.

На фиг. 9 приведена практическая схема моста для измерения емкостей. От схемы, приведенной на фиг. 8, она отличается тем, что у нее ветвь *агв* (два нижних плеча) состоит не из двух, а из пяти слюдяных конденсаторов постоянной емкости. Образцовый конденсатор $C_э$ — переменный, с воздушным диэлектриком и с максимальной емкостью 500 *пф*. С помощью переключателя *П* можно менять соотношение емкостей, входящих в плечи *аг* и *гв*, и тем самым получать необходимые диапазоны измерений. В качестве конденсатора $C_э$ лучше всего использовать конденсатор прямоемкостного типа, так как в этом случае графики градуировки моста получаются линейными.

С указанными на схеме данными емкостей C_1—C_5 мост имеет следующие 4 диапазона измерения: первый — до 300 *пф*, второй — до 1 000 *пф*, третий — до 7 500 *пф* и

четвертый — до 50 000 *пф*. Минимальная емкость, которую можно измерить мостом, — 25 ÷ 30 *пф*.

После сборки моста его необходимо проградуировать. Это можно сделать с помощью набора образцовых емкостей. При градуировке переключатель *П* моста сначала устанавливается на первый диапазон измерения, а к зажимам C_x поочередно подключают образцовые емкости до 300 *пф*. С помощью конденсатора $C_э$ мост каждый раз балансируется, и записываются значения емкостей, подключенных к зажимам C_x, и соответствующие им значения градусов шкалы конденсатора $C_э$. На основании полученных данных составляется таблица градуировки, представляющая собой зависимость делений шкалы конденсатора $C_э$ от измеряемой емкости C_x. Подобным образом градуируются и остальные диапазоны, но при этом используются образцовые емкости с другими величинами (для второго диапазона до 1 000 *пф*, для третьего до 7 500 *пф* и для четвертого до 50 000 *пф*).

Данные градуировки для каждого диапазона можно затем нанести на шкалу переменного конденсатора $C_э$ либо построить по ним графики градуировки. Такие графики будут показывать зависимость измеряемой емкости от угла поворота ротора (делений шкалы) переменного конденсатора $C_э$. Обычно графики составляются таким образом, что по горизонтальной оси откладываются градусы поворота ротора переменного конденсатора $C_э$, а по вертикальной оси — значения емкости C_x. При таком способе градуировки моста нет необходимости иметь градуированную переменную емкость.

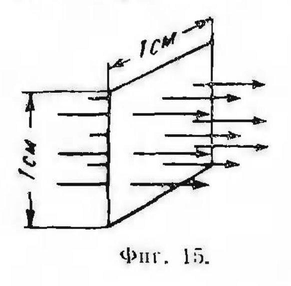
Питание моста производится от сети переменного тока или от звукового генератора. Напряжение, подаваемое на диагональ *ав* моста, должно быть порядка 35—40 *в*. Мост можно питать и зуммерным генератором *з*, как это показано на фиг. 9.

На фиг. 10 представлена схема более совершенного моста для измерения емкостей. Отличительной особенностью этой схемы является то, что два плеча моста образованы не емкостями, а сопротивлениями R_1 и R_2. Кроме того, для получения полного баланса моста применена компенсация угла потерь или, как говорят, регулировка фазы. Расширение диапазона измерений производится путем изменения отношений сопротивлений, входящих в плечи *аг* и *гв*, с помощью переключателя $П_1$, а также переключением концов ветвей с активными сопротивлениями с помощью переклю-

На фиг. 14 показано взаимное направление электрического тока и образованного им магнитного поля. Какое из изображенных колец принять за ток и какое за поток силовых линий, безразлично.

МАГНИТНЫЙ ПОТОК

В цепь между источником тока и витком проволоки включим реостат так, чтобы при его помощи можно было регулировать силу проходящего по витку тока. Затем, приблизив компас к середине плоскости витка, начнем перемещать ползунок реостата, постепенно уменьшая его сопротивление и увеличивая ток. Вначале стрелка компаса лишь немного отклонится от своего положения, но по мере увеличения тока отклонение ее будет все увеличиваться, пока она не повернется перпендикулярно к плоскости витка.



Фиг. 15.

Действие тока на стрелку тем сильнее, чем сильнее его магнитное поле. Следовательно, наш опыт позволяет утверждать, что **чем больше сила протекающего тока, тем больше создаваемое им магнитное поле**. До тех пор, пока мы имеем дело с магнитными полями в «пустоте» или в воздухе, магнитный поток прямо пропорционален силе тока, протекающего по витку.

Сила, с которой поле действует на стрелку компаса, определяется количеством созданных током силовых линий. Эта сила, обозначаемая буквой H, называется **напряженностью магнитного поля** и выражается **в эрстедах** (сокращенное обозначение *э*).

Напряженность магнитного поля можно характеризовать густотой силовых линий: чем больше линий проходит через единицу перпендикулярной к ним площади, тем больше напряженность магнитного поля в данном месте. При напряженности поля в 1 *э* на 1 *см*^{2} поперечного сечения поля приходится 1 силовая линия. Следовательно, можно сказать, что **напряженность магнитного поля есть число силовых линий, приходящихся на 1** *см*^{2} **поперечного сечения поля** (фиг. 15).

Общее число магнитных силовых линий, создаваемых постоянным магнитом или электрическим током, называется

Измерение с помощью моста выполняется следующим образом. Включив измеряемый конденсатор и присоединив питание к зуммеру, мы услышим в телефоне звук. Затем, вращая ротор конденсатора моста, добиваемся пропадания звука в телефоне. Если при этом по всей шкале конденсатора звук не пропадает, то с помощью переключателя $П_1$ переходим на другой диапазон измерений. Предположим теперь, что на данном диапазоне звук в телефоне заметно уменьшился на каком-то делении конденсатора, но совсем не исчезает. Для получения более острого минимума будем вращать ручку фазирующего сопротивления R_3, включив его предварительно с помощью переключателя $П_3$ последовательно с эталонной емкостью. При некоторой величине этого сопротивления ослабление слышимости звука в телефоне станет заметным. После этого опять подстраиваемся переменным конденсатором. Баланс моста достигается двумя или тремя чередованиями этих двух операций.

Все необходимые величины элементов схемы показаны на фиг. 10.

РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД

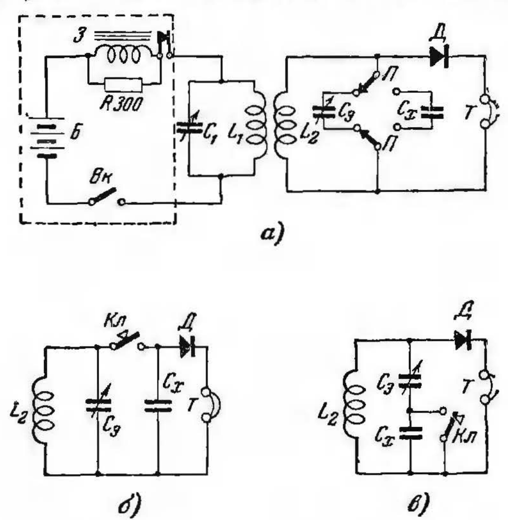
Резонансные методы измерения емкости основаны на использовании резонансных свойств колебательных контуров и применяются преимущественно на высоких частотах, так как на низких частотах резонансные явления выражены не резко, и точность измерений вследствие этого невысока.

Для измерения емкости по резонансному методу необходимо иметь генератор высокой частоты, колебательный контур с отградуированным конденсатором переменной емкости и индикатор резонанса. Точность резонансных методов зависит главным образом от устойчивости работы генератора высокой частоты.

Наиболее простыми генераторами высокой частоты являются радиочастотные генераторы с зуммерами (левая часть фиг. 11,а), принцип действия которых сводится к использованию свободных колебаний в контуре L_1C_1, питаемого при помощи зуммера $З$ от источника постоянного напряжения. В таких схемах зуммеры включаются последовательно с резонансным контуром и источником питания (батареей $Б$). За период работы контакта зуммера $з$ в колебательном контуре происходит одна серия затухающих колебаний с собственной частотой, определяемой параметрами контура L_1C_1. Колебания в контуре в этом случае могут рассматриваться как модулированные. Форма коле-

баний в контуре L_1C_1 значительно отличается от синусоидальной и поэтому богата гармониками. По этой причине в индикаторной цепи не наблюдается острой настройки.

В качестве индикатора резонанса для зуммерных генераторов обычно применяются детектор *Д* и телефон *Т*. На фиг. 11,*а* (правая часть схемы) показана схема соединения индикатора резонанса с контуром $L_2C_э$ или $L_2\ C_x$.



Фиг. 11. Схемы для измерения емкости резонансным методом в сочетании с методом замещения.

При всех недостатках зуммерные генераторы вследствие своей простоты весьма удобны для различных не очень точных измерений, и поэтому они находят довольно широкое применение в радиолюбительской практике. Лучшие результаты в отношении устойчивости работы и формы колебаний дает ламповый генератор. Если он генерирует модулированные колебания, то в качестве индикатора резонанса следует применять детектор и телофон, а при не модулированных колебаниях индикатором могут служить детектор и гальванометр.

462 — 1

Резонансный метод измерения наиболее часто применяется в сочетании с методом замещения, на рассмотрении которого мы и остановимся.

К катушке индуктивности L_2 переключателем *П* (фиг. 11,*а*) сначала подключается измеряемая емкость C_x. Затем гене-

ратор с помощью конденсатора переменной емкости C_1 настраивается в резонанс с контуром L_2C_x. Момент резонанса отмечается по максимуму слышимости в телефоне. После этого переключатель *П* перекидывается влево, и тем самым вместо емкости C_x к катушке L_2 подключается градуированный переменный конденсатор $C_э$. Не изменяя частоты настройки генератора, изменением емкости $C_э$ вновь добиваются настройки контура $L_2C_э$ в резонанс. Так как частота генератора осталась без изменения, то очевидно, что в этом случае $C_x = C_э$. При такой схеме измерения может быть определена емкость конденсаторов, лежащая в пределах от $C_{э\,мин}$ до $C_{э\,макс}$.

Для измерения малых емкостей эта схема и метод измерения несколько видоизменяются (фиг. 11,*б*). Сначала генератор настраивают в резонанс с контуром $L_2C_э$ при возможно большей емкости конденсатора $C_э = C_{э\,макс}$. Затем параллельно конденсатору $C_э$ с помощью ключа $K_л$ присоединяют неизвестную емкость C_x. Присоединение неизвестной емкости приведет к расстройке контура $L_2C_э\,C_x$ относительно частоты генератора, и для настройки его в резонанс емкость $C_{э\,макс}$ придется изменить до значения $C_{э_1}$. В таком случае измеряемая емкость

$$C_x = C_{э\,макс} - C_{э_1}. \qquad (10)$$

Если емкость измеряемого конденсатора C_x больше наибольшей емкости образцового конденсатора, то можно воспользоваться вариантом, схема которого изображена на фиг. 11,*в*. В этой схеме емкости $C_э$ и C_x соединяются последовательно. Порядок измерения в этом случае следующий. При замкнутом ключе *Кл* и минимальном значении эталлонного конденсатора $C_{э\,мин}$ настраивают генератор высокой частоты в резонанс с контуром $L_2C_{э\,мин}$. После этого ключ *Кл* размыкают и тем самым включают емкость C_x, вследствие чего общая емкость контура уменьшится, и настройка в резонанс нарушится. Увеличивая значение емкости $C_{э\,мин}$, добиваются при некотором ее значении $C_{э_1}$ настройки контура в резонанс на ту же частоту генератора.

Величина емкости C_x в этом случае находится из соотношения

$$C_x = \frac{C_{э\ мин} \cdot C_{э_1}}{C_{э_1} - C_{э\ мин}}. \quad (11)$$

В качестве катушек индуктивности L_1 и L_2 можно использовать катушки от входного контура либо контура гетеродина любого приемника, работающего в диапазоне длинных и средних волн. Удобнее всего их разместить на одном каркасе. Цепь зуммера нужно тщательно экранировать. При измерении методом резонанса в сочетании с методом замещения устраняются погрешности, связанные с влиянием индуктивности соединительных проводов и собственной емкости катушки. Точность измерения этим методом определяется в основном точностью настройки контура в резонанс и погрешностью градуировки конденсатора $C_э$.

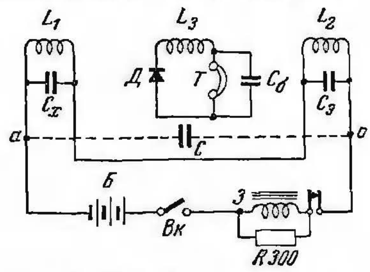
Этим методом можно измерять емкости от 2—5 до 2 000 *пф* с точностью до 10%. Дальнейшее повышение точности измерения может быть достигнуто применением ламповых генераторов высокой стабильности и выбором более точных методов индикации. в частности путем использования принципа биений. Однако при этом аппаратура значительно усложняется.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД

Более высокую точность измерения емкости можно получить, воспользовавшись дифференциальным методом, схема которого приведена на фиг. 12.

На этой схеме две одинаковые катушки индуктивности L_1 и L_2 с конденсаторами неизвестной емкости C_x и образцовой $C_э$ образуют два колебательных контура, возбуждаемые при помощи зуммерного генератора. Катушки индуктивности располагаются на одном каркасе таким образом, чтобы их магнитные поля были направлены навстречу друг другу. Катушка L_3 индикаторного контура, который состоит из детектора *Д* и телефона *Т* с блокировочным конденсатором $C_б$, связана индуктивно с катушками L_1 и L_2 и расположена симметрично по отношению к ним. При таком расположении катушек в момент равенства настроек контуров $L_1 C_x$ и $L_2 C_э$ результирующая э. д. с., наведенная в катушке L_3, будет равна нулю, и следовательно, в телефоне звука слышно не будет,

Измерение емкости производится в следующей последовательности. Присоединив параллельно одной из катушек, например L_1, измеряемую емкость, замыкают выключатель *Вк* и тем самым возбуждают колебания в обоих контурах. Затем, вращая ручку конденсатора переменной емкости, добиваются минимума либо полного пропадания звука в телефоне. В момент пропадания звука $C_x = C_э$.



Фиг. 12. Принципиальная схема измерения емкости дифференциальным методом.

Чтобы исключить ошибку измерений за счет некоторого различия в параметрах катушек L_1 и L_2, схему балансируют, дважды меняя местами конденсаторы C_x и $C_э$. Величина неизвестной емкости $C_э$ определяется из соотношения

$$C_x = \sqrt{C_{э_1} \cdot C_{э_2}},$$

где $C_{э1}$ и $C_{э2}$—емкости образцового конденсатора, соответствующие обоим включениям.

Чтобы повысить максимальное значение емкости, которая может быть измерена этим методом, следует параллельно конденсатору $C_э$ подключить дополнительную образцовую емкость. С помощью данного метода можно измерять емкости до 7—10 000 *пф*.

Схема фиг. 12 может быть использована для измерения емкости методом замещения. Для этого емкости C_x и $C_э$ включаются в один из контуров последовательно или параллельно (фиг. 11,*б* и 11,*в*), а другой контур используется для фиксирования собственной частоты первого.

При налаживании прибора, работающего по дифференциальному методу, необходимо точно установить индикаторную катушку L_3. Для этого между точками *а—б* подключается емкость *С* порядка 500—1 000 *пф*, образующая с катушками L_1 и L_2 общий колебательный контур. Правильному положению катушки L_3 по отношению к катушкам L_1 и L_2 соответствует минимум слышимости в телефоне.

В качестве индуктивностей L_1 и L_2 можно применить катушки входных контуров или контуров гетеродина от приемников, работающих в диапазонах длинных и средних волн. Индуктивность катушки L_3 подбирается опытным путем.

ОЦЕНКА МЕТОДОВ

Метод вольтметра-амперметра (фиг. 3) отличается простотой схемы и не требует эталонных конденсаторов. Им можно воспользоваться для измерения сравнительно больших емкостей (свыше 0,2 *мкф*). Для измерения малых емкостей этот метод не применяется, так как сопротивление цепи велико, и поэтому возникают трудности, связанные с измерением очень малых величин силы тока. Основные недостатки данного метода — малая точность измерения и необходимость иметь два измерительных прибора.

Метод сравнения (фиг. 4) требует применения лишь одного измерительного прибора, причем этот прибор выполняет функции индикатора. Диапазон измерения емкостей определяется чувствительностью индикатора. Недостаток метода сравнения — необходимость наличия набора эталонных емкостей.

Для измерения емкостей от 20 до 1 000 *пф* можно рекомендовать схему фиг. 5 (схема Ю. Кравченко). Эта схема является вариантом метода сравнения, не требует дорогостоящих измерительных приборов и обеспечивает точность измерения, достаточную для радиолюбительской практики.

При наличии у радиолюбителя вольтметра переменного тока с достаточно высоким входным сопротивлением можно рекомендовать схему микрофарадометра (фиг. 7). Прибор, собранный по такой схеме, обеспечивает довольно широкие пределы измерения емкостей. Микрофарадометр целесообразно объединять со схемой авометра, так как в этом случае более полно используется вольтметр. Прибор может быть также использован для измерения индуктивности катушек и сопротивлений. Для этого потребуется только произвести соответствующую градуировку.

Мостовые схемы обеспечивают измерение широкого диапазона емкостей с гораздо большей точностью, чем любой из указанных выше методов. Кроме того, для изготовления прибора, работающего по мостовой схеме, не требуется дефицитных деталей.

Выбор того или иного метода измерения емкости зависит от наличия у радиолюбителя соответствующей измерительной аппаратуры и диапазона емкостей конденсаторов, которые подлежат измерению.

ШКАЛА НОМИНАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЕМКОСТЕЙ

Государственным стандартом (ГОСТ 2519-49) установлена шкала емкостей электрических конденсаторов постоянной емкости в пределах от 1 *мкмкф* до 2 000 *мкф* с допустимыми отклонениями от номинала ± 5%, ± 10%, ± 20% и более.

Эта шкала служит основанием для выбора номинальных значений емкости конденсаторов.

Номинальные значения емкостей электрических конденсаторов от 1 *мкмкф* до 2 000 *мкф*

мкмкф				*мкф*					
1	10	100	1 000	0,01	0,1	1	10	100	1 000
	11	110	1 100						
	12	120	1 200	0,012	0,12	1,2	12	120	1 200
	13	130	1 300						
1,5	15	150	1 500	0,015	0,15	1,5	15	150	1 500
	16	160	1 600						
	18	180	1 800	0,018	0,18	1,8	18	180	1 800
2	20	200	2 000	0,02	0,2	2	20	200	2 000
	22	220	2 200						
2,5	24	240	2 400						
	27	270	2 700	0,025	0,25	2,5	25	250	
3	30	300	3 000						
	33	330	3 300	0,03	0,3	3	30	300	
3,5	36	360	3 600						
4	39	390	3 900	0,04	0,4	4	40	400	
4,5	43	430	4 300						
	47	470	4 700						
5	51	510	5 100	0,05	0,5	5	50	500	
5,5	56	560	5 600						
6	62	620	6 200	0,06	0,6	6	60	600	
7	68	680	6 800	0,07	0,7	7	70	700	
	75	750	7 500						
8	82	820	8 200	0,08	0,8	8	80	800	
9	91	910	9 100						

Цена 60 к.

Мне всегда нравились старые, сильно потрёпанные книжки. Потрёпанность книги говорит о её высокой востребованности, а старость о вечно ценном содержании. Всё сказанное в большей степени касается именно технической литературы. Только техническая литература содержит в себе ту великую и полезную информацию, которая не подвластна ни политическим веяниям, ни моде, ни настроениям! Только техническая литература требует от своего автора по истине великих усилий и знаний. Порой требуется опыт целой жизни, чтобы написать небольшую и внешне невзрачную книгу.

К сожалению ни что не вечно в этом мире, книги треплются, разваливаются на отдельные листы, которые затем рвутся в клочья и уходят в никуда. Плюс ко всему орды варваров, которым без разницы, что бросить в костёр или чем вытереть свой зад. Именно их мы можем благодарить за сожженные и растоптанные библиотеки.

Если у Вас есть старая книга или журнал, то не дайте им умереть, отсканируйте их и пришлите мне. Совместными усилиями мы можем создать по истине уникальное и ценное собрание старых технических книг и журналов.

Сайт старой технической литературы:

http://retrolib.narod.ru